



Bachelorarbeit zum Thema Bruchmechanische Untersuchungen an AFP-Stählen

Mirjam Kny
(MB08w2-B, 26144)

Fakultät Maschinenbau

Studiengang Maschinenbau/Fertigungstechnik

Mittweida, den 20. Oktober 2011

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

Die vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung:

Kny, Mirjam:

Bruchmechanische Untersuchungen an AFP-Stählen. – 2011. – 38 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2011

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, die AFP-Stähle 18MnVS5 und 30MnVS6+Ti mit Hilfe bruchmechanischer Untersuchungen hinsichtlich ihres Bruchzähigkeitsverhaltens näher zu betrachten. Dabei wurden Kerbschlagbiegeversuche ausgewertet, die Korngröße einiger repräsentativer Proben analysiert, sowie statische Bruchmechanikversuche mit Dreipunkt-Biegeproben durchgeführt. Die Arbeit enthält die Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung sowie die Auswertung der Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche samt mathematischem Hintergrund, die Methodik und Auswertung der Bestimmung der scheinbaren Korngröße, die theoretischen Grundlagen der statischen Bruchmechanik (LEBM-Methodik) sowie die Versuchsbedingungen, die Versuchsdurchführung und die dazugehörige Auswertung. Des weiteren wurde der Zusammenhang der Übergangstemperaturen aus Kerbschlagbiegeversuch und statischer Bruchmechanik nach Wallin und Sanz dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	6
1 Einleitung und Aufgabenstellung	7
2 Kerbschlagbiegeversuche	8
2.1 Theoretische Grundlagen	8
2.2 Versuchsdurchführung	8
2.3 Versuchsauswertung und Ansatzfunktion	8
2.3.1 Ergebnisse vorangegangener wissenschaftlicher Untersuchungen	10
3 Korngrößenbestimmung	13
3.1 Theoretische Grundlagen	13
3.2 Bestimmung der scheinbaren Korngröße	13
4 Statische Bruchmechanik	16
4.1 Theoretische Grundlagen	16
4.2 Probengeometrie	18
4.3 Ermüdungsanriss	18
4.4 Statische 3PB-Versuche	21
4.4.1 Versuchsdurchführung	21
4.4.2 Versuchsauswertung	23
5 Zusammenfassung	32
Anhang	I
Normenverzeichnis	IV
Literaturverzeichnis	V
Selbstständigkeitserklärung	VI

Abbildungsverzeichnis

2.1	A_v - T -Diagramm 18MnVS5	10
2.2	A_v - T -Diagramm 30MnVS6+Ti	11
2.3	44-1-5 Querschnitt	12
2.4	44-1-6 Querschnitt	12
3.1	Beispielbild metallographisch	14
3.2	Beispielbild binär	14
4.1	Rissöffnungsmoden, aus [1, S.54]	16
4.2	Abhängigkeit der Bruchzähigkeit für Mode I von der Bauteildicke, aus [1, S.56] .	17
4.3	Mindestprobendicke und -risslänge in Abhängigkeit vom Verhältnis $0,2\text{-Dehngrenze}/E$ - Modul, aus [1, S.91]	17
4.4	Abmaße der Dreipunkt-Biegeprobe, aus [1, S.88]	18
4.5	Resonanzprüfmaschine der Sinco Tec GmbH	19
4.6	Ermüdungsrissvermessung an Probe 44-5-2	21
4.7	3PB-Versuchsvorrichtung	22
4.8	3PB-Vorrichtung mit Kühlkammer, Temperaturfühler und COD-Clip	22
4.9	Proben mit spezieller Kerbgeometrie	22
4.10	Ermittlung der Risslänge aus der Probenbruchfläche, aus [1, S.96]	24
4.11	Bruchfläche der Probe 44-5-3 mit Messraster	24
4.12	F-COD-Diagramm 44-6-3, Sprödbbruch, Versuch bei -40°C	25
4.13	F-COD-Diagramm 43-6-2, Pop-In, Versuch bei 0°C	25
4.14	F-COD-Diagramm 44-5-2, Versuch bei Raumtemperatur	27
4.15	Beispiel zur T_{100} -Bestimmung aus [4]	28
4.16	Masterkurve des 30MnVS6+Ti	30
4.17	Masterkurve des 18MnVS5	30
4.18	Korrelation der T_{100} und T_{27J} nach Sanz aus [4]	31
4.19	Sanz-Korrelation für AFP-Stahl	31

Tabellenverzeichnis

3.1	Kennzahl G_{Ferrit} der Proben	15
3.2	Scheinbarer Korndurchmesser d	15
4.1	Kräfte der Laststufen beim Einbringen des Ermüdungsanrisses	20
4.2	Risslängen der Ermüdungsanrisse	21
4.3	J - und K_Q -Werte des 30MnVS6+Ti	27
4.4	J - und K_Q -Werte des 18MnVS6+Ti	28
4.5	Aktualisierte J - und K_Q -Werte des 30MnVS6+Ti	29
4.6	Aktualisierte J - und K_Q -Werte des 18MnVS6+Ti	29
5.1	Härtemessung am Werkstoff 18MnVS5	III
5.2	Chemische Analyse ausgewählter Proben des Werkstoffes 18MnVS5	III

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Definition	Wert/Einheit
a	momentane Länge der Risstiefe (Kerb und Riss) der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
a_0	Ausgangsrisstiefe (Kerb und falls bereits vorhanden Ermüdungsanriss) der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
B	Breite der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
B_N	Breite der 3-Punkt-Biege-Probe bei eingebrachten Seitenkerben	mm
d	mittlerer scheinbarer Durchmesser der Körner im untersuchten Bereich	mm
F_Q	Kraft zur Berechnung von K_Q im 3PB-Versuch	N
F_{max}	maximale Kraft im 3PB-Versuch	N
f_1	Geometriefaktor der 3PB-Probengeometrie	—
G	Korngrößen-Kennzahl	—
H	Gesamtlänge der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
J	Bruchwiderstand	kN/m
K	Spannungsintensitätsfaktor	MPa \sqrt{m}
K_Q	vorläufiger Spannungsintensitätsfaktor	MPa \sqrt{m}
K_{Ic}	Bruchzähigkeit	MPa \sqrt{m}
K_{Ic}^J	Bruchzähigkeit für die T_{100} -Bestimmung	MPa \sqrt{m}
m	mittlere Anzahl der Körner auf einer Fläche von je 1mm ² im untersuchten Bereich	—
R	Verhältnis von Unter- und Oberkraft	—
S	Abstand der Kraftangriffspunkte der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
T_{27J}	Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch bei 27J	°C
T_{40J}	Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch bei 40J	°C
T_{100}	Übergangstemperatur aus stat. Bruchmechanik	°C
$V; COD$	Kerbaufweitung	mm
W	Höhe der 3-Punkt-Biege-Probe	mm
3PB	Dreipunkt-Biege	—
COD	crack opening displacement	—
KSB	Kerbschlagbiege	—

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Notwendigkeit einer quantitativen Beschreibung von Werkstoffschädigung durch Bruch, Risswachstum oder Rissstillstand entstand als Reaktion auf die immer häufiger auftretenden Schadensfälle seit der Einführung der Mittel- und Hochdruckdampfmaschine zu Beginn des 19. Jahrhunderts. In den 30er und 40er Jahren des 20. Jahrhunderts begann schließlich die Entwicklung der Bruchmechanik durch Untersuchungen katastrophaler Schäden an geschweißten Verbindungen, Brücken und Schiffen (vgl. [1, S. 13 f.]).

Heute findet die technische Bruchmechanik Anwendung in der Berechnung und Auslegung sicherheitsrelevanter Konstruktionen, der Werkstoffentwicklung sowie der werkstoffbezogenen Qualitätssicherung. Dabei wird zunächst die eigentlich am Bauteil anliegende Beanspruchung charakterisiert, das heißt die Spannungs- und Dehnungsverteilung durch geeignete Parameter dargestellt. Des Weiteren wird die Beanspruchbarkeit, die von Beanspruchungsbedingungen und Werkstoffverhalten abhängig ist, durch Werkstoffkenngrößen, die als Bruchkriterien fungieren, definiert. Ein solches Bruchkriterium ist beispielsweise das in den Untersuchungen genutzte J-Integral, das "ein Maß für die Intensität der plastischen Verformung an der Rissspitze darstellt [...]" (vgl. [1, S. 70]). Das Ergebnis dieser bruchmechanischen Untersuchungen sind quantitative Aussagen zur Bruchsicherheit und Grenznutzungsdauer für konkrete Belastungen und Geometrien, die aus der Gegenüberstellung der Beanspruchungsparameter und der Beanspruchbarkeit resultieren. [1, 2]

Die erste Teilaufgabe des Bachelorprojektes bildete die weitere Auswertung der im Praxismodul durchgeführten Kerbschlagbiegeversuche an den AFP-Stählen 18MnVS5 und 30MnVS6+Ti durch die Darstellung der mathematischen Ansatzfunktion der entstandenen Av-T-Diagramme. Außerdem wurde eine Bestimmung der scheinbaren Korngröße an einigen repräsentativen Proben vorgenommen und deren Bezug zur Kerbschlagarbeit untersucht.

Den zweiten Aufgabenbereich bildeten statische Bruchmechanikversuche zur quantitativen Beschreibung der Bruchzähigkeit der AFP-Stähle im Temperaturbereich von -40°C bis Raumtemperatur (20°C). Dieser Aufgabenteil setzte sich aus dem Einbringen der Ermüdungsanrisse, den statischen Dreipunkt-Biegeversuchen, dem Vermessen der Risslängen und der anschließenden Analyse des Risswiderstandsverhaltens zusammen. Des Weiteren sollte der Zusammenhang zwischen der Übergangstemperatur T_{27J} bzw. T_{40J} , die im Kerbschlagbiegeversuch ermittelt wurde, und der Temperatur T_{100} , die aus den statischen Bruchmechanikversuchen resultiert, dargestellt werden.

2 Kerbschlagbiegeversuche

2.1 Theoretische Grundlagen

Der Kerbschlagbiegeversuch dient dazu, die Widerstandsfähigkeit metallischer Werkstoffe gegen schlagartige Beanspruchung bei verschiedenen Temperaturen zu ermitteln. Das Ziel der Versuche war es, A_v - T -Kurven aufzunehmen um den temperaturabhängigen Einsatzbereich der AFP-Stähle zu ermitteln. Die ermittelten Wertepaare werden mit Hilfe des A_v - T -Diagramms ausgewertet, so dass der Übergangsbereich sowie Hoch- und Tieflage erkennbar werden. So kann die kritische Übergangstemperatur ermittelt werden, wofür verschiedene Methoden zum Einsatz kommen können: Entweder wird die kritische Übergangstemperatur bei der Hälfte der Hochlage bestimmt, anhand der Bruchflächenbewertung bei der Temperatur mit 50% Gleitbruchanteil festgelegt oder, wie in diesem Fall, bei einem bestimmten Kerbschlagarbeitswert ($A_v = 27\text{J}$ oder $A_v = 40\text{J}$) abgelesen [nor90].

2.2 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Kerbschlagarbeit wurden je Werkstoff 25 Proben verwendet. Die dabei verwendete Probenform mit V-Kerb sowie das Pendelwerk erfüllen die Anforderungen nach DIN EN 10045 Teil 1. Die Versuche wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt, wobei zunächst fünf verschiedene Temperaturen zur Abschätzung der Lage der jeweiligen A_v - T -Kurve genutzt wurden (-22°C , 0°C , 20°C (Raumtemperatur), 50°C und 100°C). Die weiteren Temperaturen wurden im Bereich von 30K um die vermutete Übergangstemperatur gewählt, um diesen Bereich statistisch möglichst genau abbilden zu können. Die Temperatur wurde mittels Ofen, Eiswasser und eines Thermoelementes mit einer Genauigkeit von $\pm 5\text{K}$ eingestellt.

2.3 Versuchsauswertung und Ansatzfunktion

Jeweils 25 Kerbschlagbiegeversuche (Werte siehe Anhang A.1 und A.2) wurden für den 18MnVS5 und den 30MnVS6+Ti durchgeführt. Um die Übergangstemperaturen zu ermitteln, wurden die oberen und unteren Hüllkurven zur Begrenzung der Streubänder, sowie die darin liegende Mittelwertkurve bestimmt. Da nur jeweils 25 Versuche durchgeführt wurden und eine statistische Absicherung demzufolge nicht gewährleistet werden kann, war es notwendig, die zur Anpassung des

Kurvenverlaufs genutzten Parameter bei der Bestimmung der Hüllkurven und der Mittelwertkurve entsprechend anzupassen. In Erwartung eines s-förmigen Kurvenverlaufs erschien es sinnvoll, eine Sigmoidfunktion als Ansatzfunktion zu wählen; in diesem Fall die Klasse der logistischen Funktionen in 4 Parametern:

$$f_{p_1, p_2, p_3, p_4}(x) = p_1 + \frac{p_2}{1 + p_3 e^{-p_4 x}} \quad (1)$$

Diese lässt sich auch in eine tanh-Darstellung bringen:

$$\begin{aligned} f_{p_1, p_2, p_3, p_4}(x) &= p_1 + \frac{p_2}{1 + p_3 e^{-p_4 x}} = p_1 + \frac{p_2}{1 + e^{\log(p_3) - p_4 x}} = p_1 + \frac{p_2}{1 + e^{-2w}} \\ &= p_1 + \frac{p_2}{2} \left(\frac{2}{1 + e^{-2w}} - 1 + 1 \right) = p_1 + \frac{p_2}{2} \left(\frac{1 - e^{-2w}}{1 - e^{-2w}} + 1 \right) \\ &= p_1 + \frac{p_2}{2} \left(\frac{e^w - e^{-w}}{e^w + e^{-w}} + 1 \right) = p_1 + \frac{p_2}{2} (\tanh(w) + 1) \\ &= p_1 + \frac{p_2}{2} \left(\tanh \left(\frac{p_4 x - \log(p_3)}{2} \right) + 1 \right), \text{ wobei } w := -\frac{\log(p_3) - p_4 x}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Es seien T_1, \dots, T_{n_T} die $n_T \in \mathbb{N}$ verschiedenen Versuchstemperaturen. Für die k -te Versuchstemperatur, $k \in \{1, \dots, n_T\}$, seien $A_{v,1}(k), \dots, A_{v,n_P}(k)$ die aufgenommenen $n_P(k) \in \mathbb{N}$ Kerbschlagarbeiten und

$$A_{v,\min}(k) := \min \{A_{v,1}(k), \dots, A_{v,n_P}(k)\}, \quad A_{v,\max}(k) := \max \{A_{v,1}(k), \dots, A_{v,n_P}(k)\}.$$

Um die obere Hüllkurve zu bestimmen wurde die Funktion

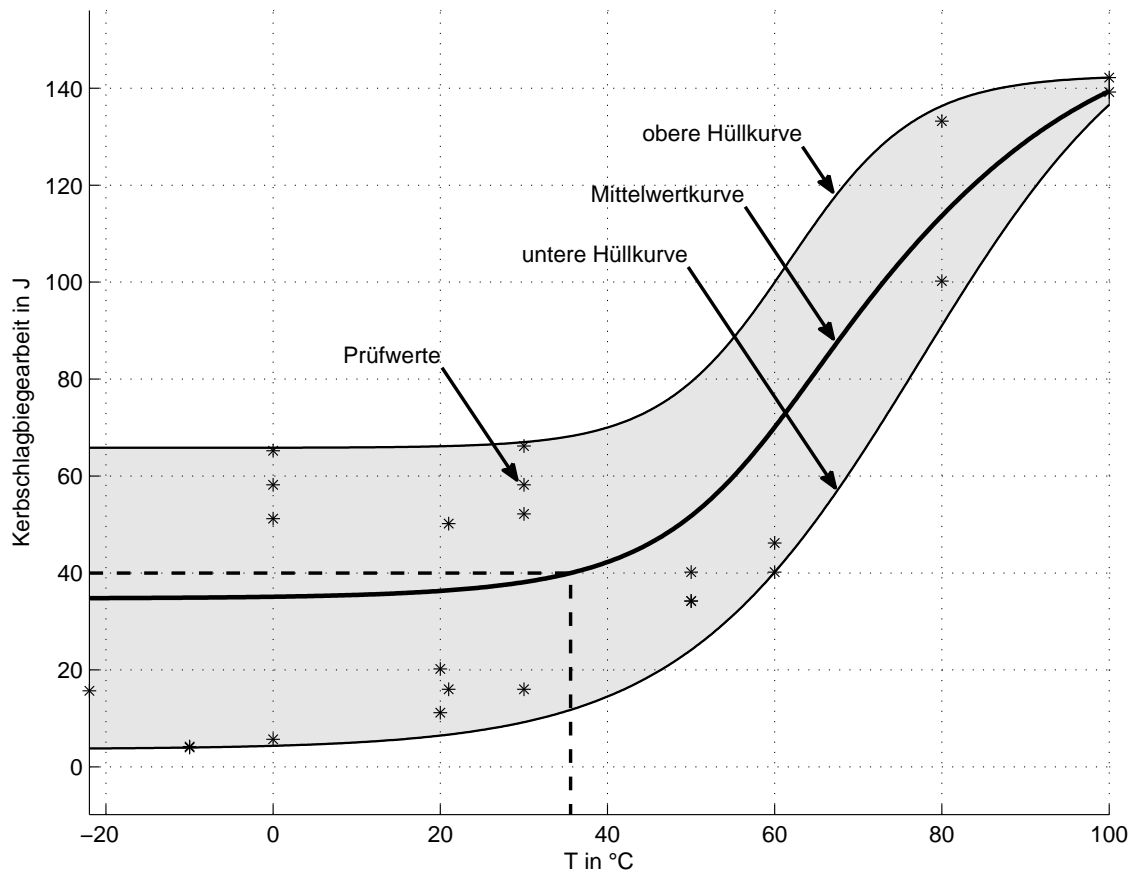
$$g_{\max} : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}, \quad (p_1, p_2, p_3, p_4) \mapsto \sum_{k=1}^{n_T} |f_{p_1, p_2, p_3, p_4}(T_k) - A_{v,\max}(k)| \quad (3)$$

über dem Parameterraum \mathbb{R}^4 und unter der Nebenbedingung

$$f_{p_1, p_2, p_3, p_4}(T_k) \geq A_{v,\max}(k), \text{ für alle } k \in \{1, \dots, n_T\},$$

minimiert; analog die untere Hüllkurve mit Hilfe der $A_{v,\min}$ -Werte.

Anhand der als Mittelwertkurve der Hüllkurven entstehenden ebenfalls s-förmigen Mittelwertkurve (siehe Abb. 2.1 und Abb. 2.2) wurden so die Übergangstemperaturen bestimmt. In beiden Diagrammen sind Hoch- und Tieflage erkennbar, sowie das Streuband, dass durch untere und obere Hüllkurve begrenzt wird. Unterschiede treten bei der Größe des Streubandes, vor allem im Übergangsbereich, auf: Während beim 30MnVS6+Ti ein Streuband von $\pm 10\text{K}$ eine deutlich bestimmbare Übergangstemperatur von $T_{27J} = 60^\circ\text{C}$ ermöglicht, wird durch das breite Streuband von $\pm 30\text{K}$ beim 18MnVS5 die genaue Bestimmung der Übergangstemperatur erschwert. Außerdem war aufgrund der Lage der Kurve ein Bestimmen der T_{40J} nötig, sodass hier eine Übergangstemperatur von $T_{40J} = 35^\circ\text{C}$ bestimmt wurde.

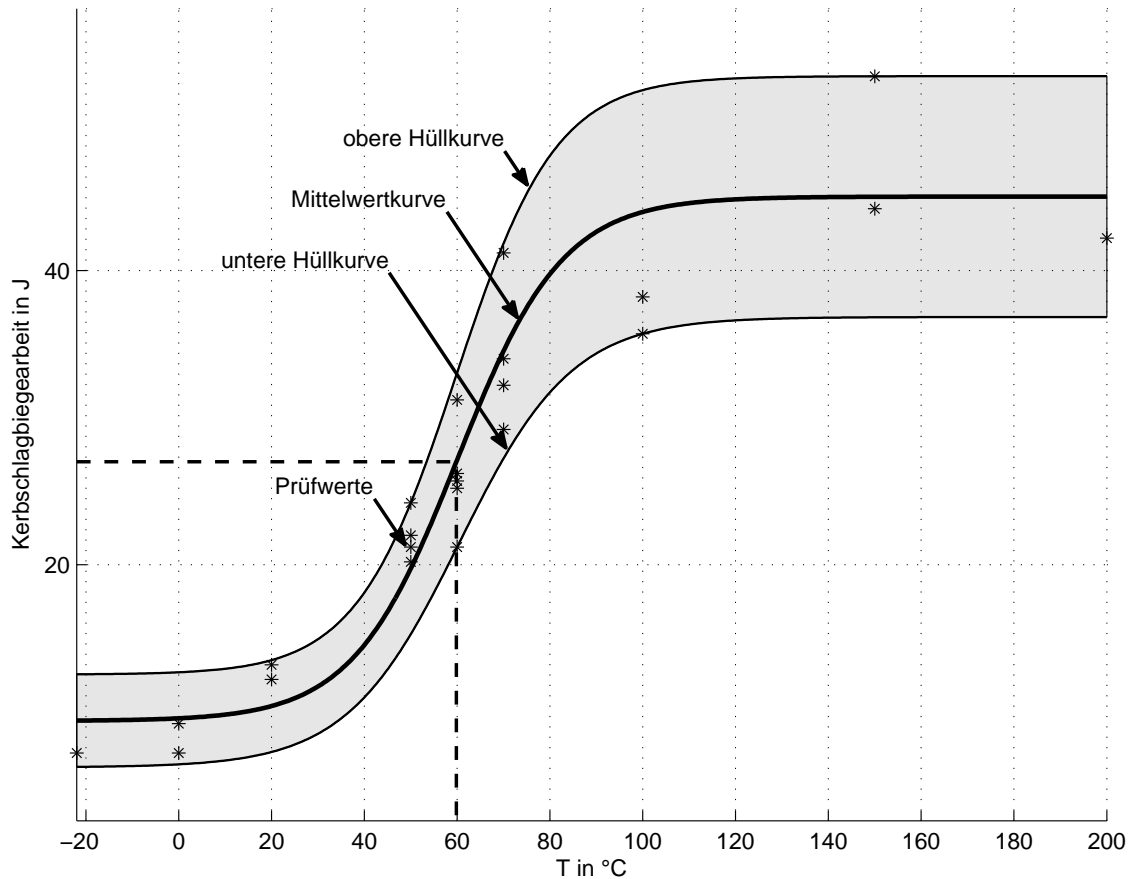
Abbildung 2.1: A_v - T -Diagramm 18MnVS5

Da bei der Ermittlung der A_v - T -Kurve des 18MnVS5 dieses breite Streuband auftrat, waren Untersuchungen nötig, um die Ursache zu bestimmen. Im Rahmen einer vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeit wurden metallographische Schliffe angefertigt, eine chemische Analyse durchgeführt, sowie Untersuchungen an der Bruchfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden Kapitel aufgeführt. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Kerbschlagarbeit und Korngröße findet sich in Kapitel 3.

2.3.1 Ergebnisse vorangegangener wissenschaftlicher Untersuchungen

Für die weiteren Untersuchungen wurden jeweils vier repräsentative Proben des Werkstoffes 18MnVS5 genutzt, die bei gleicher Versuchstemperatur eine hohe Differenz in den Kerbschlagarbeitswerten aufwiesen (44-1-5 und 44-1-6 sowie 44-3-3 und 44-3-4, siehe Anhang A.1).

Zunächst wurde eine Härtemessung nach Vickers [nor05] vorgenommen, deren Ergebnisse in Anhang A.3 zu finden sind. Die Proben 44-3-3 und 44-3-4 weisen eine etwa gleiche Härte auf, womit ein Härteunterschied als Ursache für die Kerbschlagarbeitsdifferenz ausscheidet. Dahingegen weisen die Proben 44-1-5 und 44-1-6 eine durchschnittlicher Härte Differenz von ca. 20HV10 auf,

Abbildung 2.2: A_v - T -Diagramm 30MnVS6+Ti

weswegen anzunehmen ist, dass die höhere Härte und damit geringere Widerstandsfähigkeit der Probe 44-1-5 gegen schlagartige Belastung gegenüber Probe 44-1-6 der Grund für die geringere Kerbschlagarbeit ist.

Die chemische Analyse ergab für die repräsentativen Proben kaum Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, womit dies als Ursache für die Streuungen der Kerbschlagarbeitswerte ausgeschlossen werden kann. Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind in Anhang A.4 zu finden.

Bei den metallographischen Untersuchungen wurden die Proben jeweils im Quer- und Längsschnitt mit 10-facher und 50-facher Objektiv-Vergrößerung betrachtet und die jeweiligen bei gleicher Temperatur geprüften Proben miteinander verglichen. Der Vergleich der Proben 44-1-5 und 44-1-6 brachte die Erkenntnis, dass aufgrund eines höheren Anteils an Bainit in 44-1-5 (siehe Abb. 2.3), welcher die Härte eines Werkstoffes erhöht und somit eine geringere Zähigkeit verursacht, sowie einer positiv auf die Zähigkeit wirkenden leichten Zeiligkeit in 44-1-6 (siehe Abb. 2.4), die Probe 44-1-6 eine höhere Kerbschlagarbeit ertragen kann als 44-1-5. Die Proben 44-3-3 und 44-3-4 weisen einander ähnliche Schliffbilder auf, in beiden Proben findet sich inhomogen verteilter Bainit. Somit lässt sich für diese beiden Proben die Differenz der Kerbschlagarbeit nicht durch die

metallographischen Untersuchungen begründen.

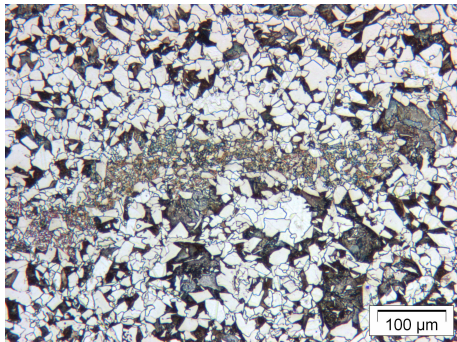


Abbildung 2.3: 44-1-5 Querschnitt
Objektiv: 10x; mit 3%-igem Nital geätzt
Ferrit, Perlit, oberer Bainit

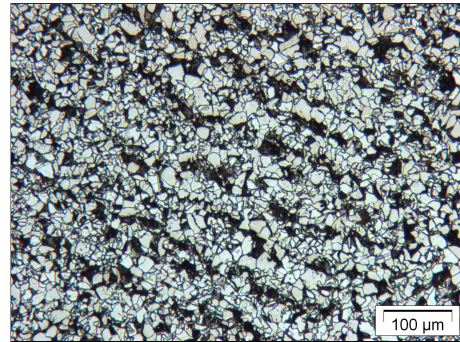


Abbildung 2.4: 44-1-6 Querschnitt
Objektiv: 10x; mit 3%-igem Nital geätzt
Ferrit, Perlit (Bainit)

Aus diesem Grund war eine weitere Untersuchung notwendig um die Bruchfläche näher zu betrachten. Hierfür wurde eine REM-Analyse genutzt, bei der auch zwei weitere Proben, die eine ähnlich hohe Differenz in der Kerbschlagarbeit aufweisen, untersucht wurden. Hierbei zeigte sich, dass die Proben, die jeweils eine höhere Kerbschlagarbeit aufweisen in ihrer Bruchfläche feinkörniger sind. Somit ist die Feinkörnigkeit in den Bruchflächen Ursache für die Differenzen der Kerbschlagarbeit. Um dies zu untermauern wurde als weitere Untersuchung eine Bestimmung der scheinbaren Korngröße durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 3 aufgeführt sind.

3 Korngrößenbestimmung

3.1 Theoretische Grundlagen

Die mikrophotographische Bestimmung der scheinbaren Korngröße wird laut DIN EN ISO 643 mittels Bestimmung der Kennzahl G durchgeführt und ist durch zwei verschiedene Wege gekennzeichnet: Eine Möglichkeit ist das Auszählen der Schnittpunkte einer Messlinie oder eines Messkreises mit Korngrenzen oder Körnern und die anschließende Bildung eines Mittelwertes. Die Alternative ist die Bestimmung über der Kennzahl G durch Vergleiche mit Bildreihentafeln oder Zählung der mittleren Anzahl von Körnern je Flächeneinheit. Genutzt wurde die Methode zur Bestimmung der Korngrößenkennzahl G mittels Zählung der mittleren Anzahl der Körner je Flächeneinheit. Es ist möglich, dass je nach Methode verschiedene Ergebnisse auftreten.

Bei der mikrophotographischen Bestimmung ist zu beachten, dass nur eine **scheinbare** Korngröße ermittelt wird, da die Bestimmung anhand eines Schliffes, also eines 2D-Bildes, erfolgt und nicht an vollständigen dreidimensionalen Körnern. Weiterhin ist die Bestimmung der scheinbaren Korngröße aufgrund ihrer Durchführung nur für einphasige Ferrit- oder Austenitgefüge ausgelegt.

Bei der Bestimmung der Korngrößenkennzahl G wird die mittlere Anzahl der Körner auf einer bestimmten Fläche ermittelt. Hierfür gibt es spezielle Programme, welche ermöglichen, an einem mit einem Mikroskop aufgenommenen Bild diese Kennzahl G zu bestimmen. Bereits anhand der Kennzahl G ist es möglich Unterschiede in der Größe der Körner zu sehen, da die Körner mit größer werdender Kennzahl G feiner sind.

Durch die Kennzahl G ist mittels Gl. (4) der mittlere scheinbare Korndurchmesser \bar{d} berechenbar.

$$\bar{d} = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad \text{mit} \quad m = 8 \cdot 2^G \quad (4)$$

Dabei ist m die mittlere Anzahl der Körner auf einer Fläche von 1mm^2 und G wird als ganzzahliger Wert eingesetzt. [nor03]

3.2 Bestimmung der scheinbaren Korngröße

Das Ziel der Bestimmung der scheinbaren Korngröße der Werkstoffproben des 18MnVS5 war es, herauszufinden, ob und welchen Zusammenhang es zwischen der Korngröße und der Kerbschlagarbeit des KSB-Versuches gibt und diesen gegebenenfalls herauszustellen. Dazu wurden die

Korngrößen einiger repräsentativer KSB-Proben (44-1-5 und 44-1-6, sowie 44-3-3 und 44-3-4) an jeweils drei verschiedenen Stellen auf dem Längsschliff bestimmt.

Um die Korngröße bestimmen zu können wurde zunächst die Korngrößenkennzahl G ermittelt. Bei der Bestimmung von G wurde bei 20-facher Objektiv-Vergrößerung die mittlere Anzahl der Körner auf einer Fläche von $83732,55\mu\text{m}^2$ bestimmt. Dazu wurde im Programm „analySIS work“ ein Programmpaket namens „Grains“ genutzt, welches es ermöglicht ein aufgenommenes Bild durch definierte Trenner in ein Binärbild umzuwandeln, an dem dann die planimetrische Messung zur Bestimmung der Kennzahl G erfolgt.

Für die mikroskopische Betrachtung wurden die Proben wie folgt präpariert: Zunächst wurden die Proben zerteilt und in Einbettmasse eingelegt, danach wurden die entstandenen Präparate geschliffen, poliert und mit 3%-iger ethanolischer Salpetersäure (Nital) geätzt. Nun wurden Bilder der Präparate, die der Fläche von $83732,55\mu\text{m}^2$ entsprechen, unter einem umgekehrten Auflichtmikroskop (PMG3 Olympus) aufgenommen (siehe Abb.3.1) und mit Hilfe des Programmes „analySIS work“ analysiert.

Zur Auswertung mit „analySIS work“ wurde mittels Trenner und planimetrischer Messung, wie oben beschrieben, ein Binärbild der Aufnahme erstellt (siehe Abb. 3.2), welche zur Auszählung der Körner und der daraus resultierenden Kennzahl G genutzt wurde. Dabei werden alle komplett erkennbaren Körner erfasst (grün gefärbte Korngrenzen, siehe Abb. 3.2) und diejenigen, die am Rand nur teilweise zu erkennen sind (rot gefärbte Korngrenzen, siehe Abb. 3.2), aus der Bestimmung der Werte ausgeschlossen.

Wie im Vergleich des Bildes 3.1 mit Bild 3.2 auffällt, werden die Ferritkörner, deren Korngrenzen einen ausreichenden Kontrast zum Umfeld haben, vom Programm „analySIS work“ erkannt. Dagegen werden die Perlitkörner entweder aufgrund ihres metallographischen Erscheinungsbildes als Lammellen nicht als ein, sondern als mehrere Körner oder aufgrund ihrer dunklen Färbung als breite Korngrenze erkannt. Folglich ist die scheinbare Korngröße der Ferritkörner erkenn- und bestimmbar, die der Perlitkörner jedoch zu klein bestimmt oder nicht erkannt wird.

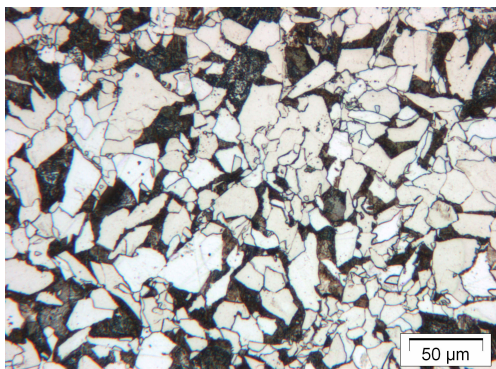


Abbildung 3.1: Beispielbild metallographisch

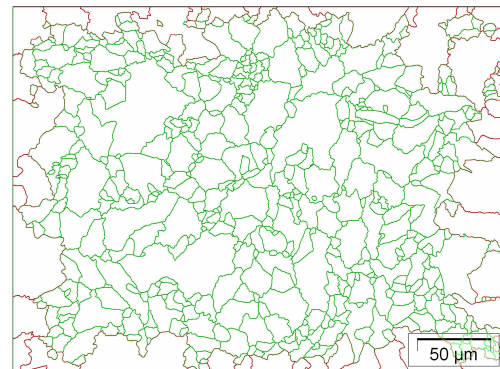


Abbildung 3.2: Beispielbild binär

Das Ergebnis der Untersuchungen mittels „analySIS“ ist ein zweigeteiltes. Einerseits wird ein

Gesamt- G -Wert herausgestellt, der aber aufgrund der obigen Ausführungen keine eindeutige Aussage besitzt, da die zu fein erkannten Perlitkörner in diesem Wert enthalten sind. Andererseits lässt das Programm „analySIS“ eine Klassifizierung zu, was in diesem Fall bedeutet, dass es zwei Klassifikationen gibt. Eine Klasse für die zu fein angenommenen Perlitkörner und eine für die Ferritkörner (G_{Ferrit}). Die Ergebnisse des G -Wertes der Ferritkörner sind also verwertbar. Die einzelnen Daten und Mittelwerte der erhaltenen Daten der Werte für die Ferritkörner (G_{Ferrit}) sind in Tabelle 3.1 aufgezeigt, wobei die Werte für die Berechnung des scheinbaren Korndurchmessers \bar{d} gerundet verwendet wurden.

Tabelle 3.1: Kennzahl G_{Ferrit} der Proben

Proben-Nr.	$A_v[\text{J}]$	$T[^\circ\text{C}]$	G_1	G_2	G_3	$\tilde{G}_{\text{Ferrit}}$	$\tilde{G}_{\text{Ferrit}}$, gerundet
44-1-5	5,7	0	8,49	8,54	8,83	8,62	9
44-1-6	58,2	0	9,75	10,01	9,83	9,86	10
44-3-3	16,0	30	8,88	8,92	8,15	8,65	9
44-3-4	58,2	30	8,70	8,56	8,53	8,59	9

Die scheinbaren Korndurchmesser der Proben wurden nun mit Hilfe der G -Werte und Gleichung (4) berechnet und in Tabelle 3.2 dargestellt. Hierbei fällt auf, dass zwischen der Kennzahl, und dementsprechend auch dem scheinbaren Korndurchmesser, der Proben 44-1-5 und 44-1-6 ein Unterschied besteht. Die Kennzahl G der Probe 44-1-6 ist kleiner als die der Probe 44-1-5 und somit ist auch ihr scheinbarer Korndurchmesser geringer (siehe 3.2), das heißt 44-1-6 ist feinkörniger als 44-1-5. Dieses Ergebnis zeigt eine Ursache für die Tatsache auf, dass Probe 44-1-6 eine höhere Kerbschlagarbeit ertragen hat als Probe 44-1-5, da ein feinkörniger Werkstoff eine höhere Zähigkeit besitzt und somit eine höhere Kerbschlagarbeit aufnehmen kann (vgl. Anhang A).

Tabelle 3.2: Scheinbarer Korndurchmesser d

Proben-Nr.	m_{Ferrit}	$d_{\text{Ferrit}}[\text{mm}]$
44-1-5	4096,00	0,015625
44-1-6	8192,00	0,011049
44-3-3	4096,00	0,015625
44-3-4	4096,00	0,015625

Für die Proben 44-3-3 und 44-3-4 entsteht hier keine Differenz zwischen den Kenngrößen und den scheinbaren Korndurchmessern, woraus man schließen könnte, dass die beiden Proben gleichgroße Körner besitzen. Aufgrund der Tatsache, dass die Kennzahl G auf eine ganze Zahl gerundet wurde und bei der Bestimmung der Kennzahl nur eine Methode zum Einsatz kam, kann man dennoch nicht ausschließen, dass eine der Proben feiner ist als die andere. Der Fakt, dass eine der Proben (44-3-4) eine höhere Kerbschlagarbeit ertragen hat als die andere (44-3-3), lässt die Vermutung zu, dass die Probe 44-3-4 feinkörniger ist als 44-3-3, denn, wie oben bereits beschrieben, trägt ein feinkörniger Werkstoff eine höhere Kerbschlagarbeit.

Somit ist anhand der Bestimmung der scheinbaren Korngröße der Proben sichtbar geworden, dass man einen Korngrößenunterschied erkennen kann, dieser aber aufgrund der Tatsache, dass nur ein zweidimensionales Bild betrachtet wird, kein eindeutiges Ergebnis liefern muss.

4 Statische Bruchmechanik

4.1 Theoretische Grundlagen

Die statische Bruchmechanik hat ihren hohen Stellenwert in der Reihe der bruchmechanischen Werkstoffuntersuchungen aufgrund der aus den Versuchsergebnissen möglichen Bestimmung der Lebensdauer eines Bauteils bei einer bestimmten Beanspruchung. In der statischen Bruchmechanik wird davon ausgegangen, dass dem Werkstück durch seine aktuelle Beanspruchung bereits ein Ermüdungsanriss zugeführt wurde. Durch die bruchmechanischen Untersuchungen soll festgestellt werden, welche Lebensdauer für das Bauteil verbleibt, indem eine statische Beanspruchung aufgebracht wird. Hierfür wird die Bruchzähigkeit, auch kritischer Spannungsintensitätsfaktor genannt, K_{Ic} ermittelt. Die Bruchzähigkeit K_{Ic} ergibt sich, wenn eine Zugspannung, die zu einer einfachen Rissöffnung führt (Mode I, siehe Abb. 4.1), anliegt. Dieser Fall wird Mode I genannt und ist der am häufigsten auftretende, da er bei Bauteilen mit Oberflächen- oder Innenrissen, die unter Zug- oder Biegebeanspruchung stehen, sowie bei unter Innendruck stehenden Bauteilen auftritt.

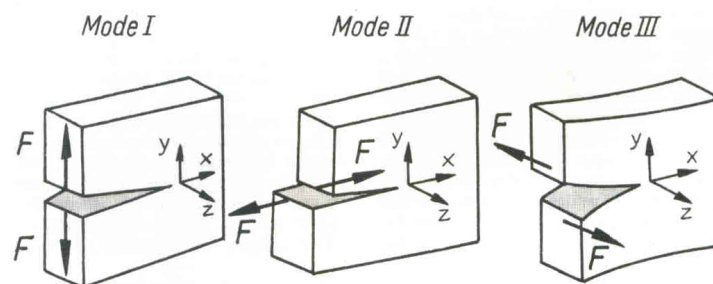


Abbildung 4.1: Rissöffnungsmoden, aus [1, S.54]

Mode I: einfache Rissöffnung → Zugspannung

Mode II: Längsscherung → ebener Schub

Mode III: Querscherrung → nichtebener Schub

Die kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} ist für den ebenen Verzerrungszustand bestimmt (siehe Abb. 4.2) und daher der untere Grenzwert der Spannungsintensität. Aufgrund dieser Tatsache kann der K_{Ic} nur für Proben eingesetzt werden, die bestimmte Rahmenbedingungen erfüllen, wie die zur Probenabmessung:

$$W - a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (5)$$

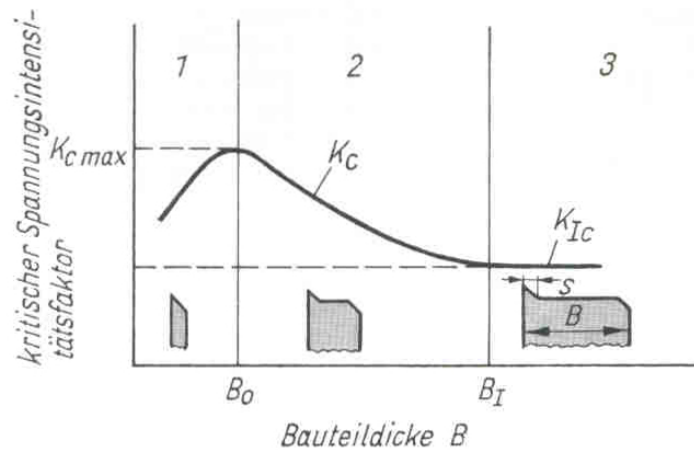


Abbildung 4.2: Abhängigkeit der Bruchzähigkeit für Mode I von der Bauteildicke, aus [1, S.56]
1 ebener Spannungszustand, 2 gemischter Spannungszustand, 3 ebener Dehnungszustand

Sollte K_{IC} , wie in diesem Fall, unbekannt sein, kann auf Geometrien, die sich in vorangegangenen ähnlichen Untersuchungen als tauglich erwiesen haben, oder Tabellen zurückgegriffen werden, die das $R_{p0,2}/E$ -Verhältnis berücksichtigen (siehe Abb. 4.3).

$100R_{p0,2}/E$	$B_{min} \ a_{min}$ mm
0,50 ... 0,57	75
0,57 ... 0,62	63
0,62 ... 0,65	50
0,65 ... 0,68	44
0,68 ... 0,71	38
0,71 ... 0,75	32
0,75 ... 0,80	25
0,80 ... 0,85	20
0,85 ... 1,00	12,5
1,00 oder größer	6,5

Abbildung 4.3: Mindestprobendicke und -risslänge in Abhängigkeit vom Verhältnis 0,2-Dehngrenze/ E -Modul, aus [1, S.91]

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei den Werkstoffen 18MnVS5 und 30MnVS6+Ti das Linear-Elastische Bruchmechanik-Konzept (LEBM-Konzept) Anwendung findet, dass „die quantitative Erfassung des Versagens angerissener Bauteile als Folge instabiler Rißausbreitung“ (aus [1, S.52]) ermöglicht. Voraussetzung zur Anwendung dieses Konzeptes ist, dass eine zumindest weitgehend linear-elastische Verformung bis zum Bruch vorliegt. Da es, vom ideal-spröden Werkstoffe einmal abgesehen, immer zu plastischer Verformung an der Rissspitze kommt, gilt für die Anwendung des LEBM-Konzeptes, dass der Bereich der irreversiblen Verformung an der Rissspitze klein gegenüber den Proben- oder Bauteilabmaßen sein soll (Kleinstbereichfließen). Aufgrund dieser Bedingung findet das LEBM-Konzept überwiegend bei spröden und hochfesten Werkstoffen Anwendung. [1, 3]

4.2 Probengeometrie

Im genutzten LEBM-Konzept wurde als Probenform die Dreipunkt-Biegeprobe (siehe Abb. 4.4), die laut Blumenauer und Pusch [1] zwar ein höheres Materialvolumen besitzt, aber dennoch aufgrund der geringeren notwendigen Prüfkraft der CT-Probe vorzuziehen ist, genutzt. Unter Berücksichtigung vorangegangener Untersuchungen wurden die folgenden Abmessungen gewählt:

$$W = 20\text{mm}, \quad B = 10\text{mm}, \quad S = 80\text{mm}, \quad H = 100\text{mm}, \quad a_0 = 8\text{mm}$$

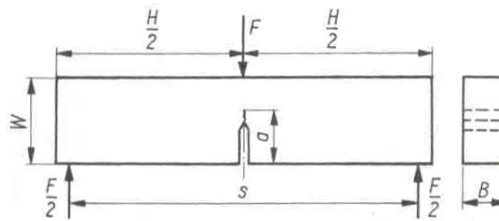


Abbildung 4.4: Abmaße der Dreipunkt-Biegeprobe, aus [1, S.88]

Die Proben wurden mit einem durch Kerbtiefe und Probenhöhe gegebenen a/W -Verhältnis von $a/W = 0,4$ gewählt, sodass der notwendige einzubringende Ermüdungsanriss eine Länge von $a_{\text{Anriss}} = 1 \dots 3\text{mm}$ aufweisen muss (siehe Kapitel 4.1.2) um der Bedingung $0,45 \leq a/W \leq 0,55$ (laut [1, S.88]) mit $a = 9 \dots 11\text{mm}$ zu genügen.

4.3 Ermüdungsanriss

Ein Bruch ist das Versagen eines Werkstückes durch einen sich stabil oder instabil ausbreitenden Riss, der durch eine äußere Belastung des Werkstückes entstanden ist. Folglich befasst sich die Bruchmechanik mit der Spannungsintensität, die aufgebracht werden muss, damit ein mit einem Riss behaftetes Bauteil zum Versagen in Form von Rissausbreitung bis zum Bruch gebracht wird.

Für die Versuche zur statischen Bruchmechanik wird in die Proben ein Ermüdungsanriss eingebracht, sodass im Versuch das Verhalten dieses Risses hinsichtlich Risswachstum bis zum eventuellen Bruch beobachtet werden kann. Aufgrund der Vorgabe $a_0 = (0,45 \dots 0,55) \cdot W$ muss die Ausgangsrisslänge a_0 für den 3PB-Versuch bei $W = 20\text{mm}$ zwischen 9 und 11mm betragen, was einen Ermüdungsanriss von 1 bis 3mm erfordert.

Die Ermüdungsanrisse wurden mit der Resonanzprüfmaschine POWER SWING Newline MAG 20kN (siehe Abb. 4.5) der Sinco Tec GmbH unter Nutzung des Programmes „Emotion II - Universelle Regelsoftware für Resonanzprüfstände“ in die Proben eingebracht. Für die Ausführung des Programmes zur dynamischen Belastung war die Berechnung der Kräfte und Laststufen notwendig. Die erforderlichen Kräfte F_m und F_a werden im Folgenden berechnet.



Abbildung 4.5: Resonanzprüfmaschine der Sinco Tec GmbH

Zunächst wird der Geometriefaktor f_1 mit $a_0 = a = 8\text{mm}$ (da a_0 und a für die Ausgangsrisslänge bzw. den momentanen Risslängenwert stehen, kann hier für beide Werte von der Länge der Starterkerbe ausgegangen werden) und $W = 20\text{mm}$ berechnet:

$$\begin{aligned}
 f_1\left(\frac{a_0}{W}\right) &= 3 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1,99 - \frac{a_0}{W} \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left[2,15 - 3,93 \cdot \frac{a}{W} + 2,7 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2\right]}{2 \cdot \left(1 + \frac{2a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \\
 &= 3 \cdot \left(\frac{8}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1,99 - \frac{8}{20} \cdot \left(1 - \frac{8}{20}\right) \left[2,15 - 3,93 \cdot \frac{8}{20} + 2,7 \cdot \left(\frac{8}{20}\right)^2\right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{8}{20}\right) \cdot \left(1 - \frac{8}{20}\right)^{\frac{3}{2}}} \\
 &= 1,9818
 \end{aligned} \tag{6}$$

Die Kraft F_a wird mit folgenden Parametern aus ΔF berechnet:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{Stahl}} &= 210000\text{MPa}, \quad K_I = 18\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} \\
 \text{aus} \quad K_I &= \frac{\Delta F \cdot S}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} \cdot f_1\left(\frac{a_0}{W}\right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{folgt} \quad \Delta F = \frac{K_I \cdot B \cdot W^{\frac{3}{2}}}{S \cdot f_1\left(\frac{a_0}{W}\right)} = \frac{18\text{MPa} \sqrt{\text{m}} \cdot 0,01\text{m} \cdot (0,02\text{m})^{\frac{3}{2}}}{0,08\text{m} \cdot 1,9818} = 3211,20\text{N} \tag{8}$$

$$\text{und somit} \quad F_a = \frac{\Delta F}{2} = 1605,60\text{N} \tag{9}$$

Die Kraft F_m wird aus F_a unter Berücksichtigung des Verhältnisses $R = 0,1$ von Unter- und Oberlast berechnet:

$$\text{aus } \Delta F = F_o - F_u \quad (10)$$

$$\text{und } R = \frac{F_u}{F_o} \quad (11)$$

$$\text{folgt } \Delta F = F_o - R \cdot F_o = (1 - R) \cdot F_o \quad (12)$$

$$\text{und somit } F_o = \frac{\Delta F}{1 - R} = \frac{3221,20\text{N}}{1 - 0,1} = 3568,00\text{N} \quad (13)$$

$$F_u = F_o - \Delta F = 3568,00\text{N} - 3211,20\text{N} = 356,80\text{N} \quad (14)$$

$$\text{damit folgt } F_m = \frac{F_o + F_u}{2} = \frac{3568,00\text{N} + 356,80\text{N}}{2} = 1962,40\text{N} \quad (15)$$

Die Laststufen sind laut Blumenauer und Pusch notwendig, denn es „hat sich als zweckmäßig erwiesen, nach dem Beginn des Rißwachstums die Oberlast schrittweise zu verringern, um die Ausbildung der plastische Zone an der Spitze des Ermüdungsrissses so klein wie möglich zu halten“ (aus [1, S.91]). Die gewählten Laststufen sind jeweils um 10% abgesenkt und erhalten durch die Stufe festgelegte Frequenzdifferenz von $\Delta f = (1,5 \dots 2,0\text{Hz})$ ein Abbruchkriterium. Es ergeben sich die in Tabelle 4.1 ersichtlichen Laststufen.

Tabelle 4.1: Kräfte der Laststufen beim Einbringen des Ermüdungsanrisses

Laststufe	$F_a[\text{N}]$	$F_m[\text{N}]$	Δf
1	1606	-1962	-2,0
2	1445	-1766	-2,0
3	1301	-1598	-1,5

Die Risslänge wurde während des Einbringens des Ermüdungsanrisses über den bereits erwähnten Frequenzabfall Δf kontrolliert. Zur Absicherung der eingestellten Lastparameter zur Erreichung der Ermüdungsanrisslänge von $1 \dots 3\text{mm}$ wurden die Proben an den Seiten in drei Schritten geschliffen, sodass der Ermüdungsanriss von außen mit dem Stereo-Mikroskop sichtbar und messbar war (siehe Abb. 4.6).

Da die Versuche zur Ermüdungsrisseinbringung weitgehend gleich verliefen, wurden die Risslängen nur stichprobenhaft bestimmt. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Nach dem Einbringen der Ermüdungsanrisse wurden die für den 3PB-Versuch notwendigen Seitenkerben eingefräst.

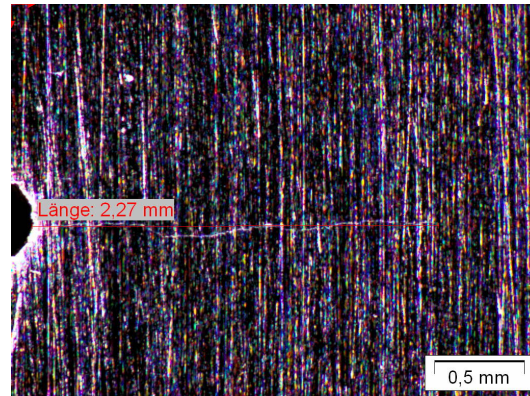


Abbildung 4.6: Ermüdungsrisssvermessung an Probe 44-5-2

Tabelle 4.2: Risslängen der Ermüdungsanrisse

Probe	Risslänge [mm]
43-5-2	1,90 ... 2,23
43-5-3	1,77 ... 2,48
43-5-4	2,16 ... 2,63
43-5-5	2,95 ... 3,20
43-5-6	2,44 ... 2,69
43-6-1	2,35 ... 2,43
43-6-3	1,43 ... 1,83
44-5-3	2,24 ... 2,27

4.4 Statische 3PB-Versuche

Der Dreipunkt-Biegeversuch (3PB-Versuch) wurde an der Universalprüfmaschine Shimadzu AGG 100kN mit Hilfe des Programms „LAB Master“ nach ISO/FDIS 12135:2001(E) durchgeführt. Die 3PB-Proben, denen vor Versuchsbeginn zur Ausbildung einer geraden Rissfront in beide Seitenflächen eine 1mm tiefe Kerbe mit einem Kerbwinkel von 60° eingebracht wurde, wurden bei -40°C , 0°C und 20°C (Raumtemperatur RT) mittels Teilentlastungsverfahren auf ihre Bruchzähigkeit geprüft.

4.4.1 Versuchsdurchführung

Bei den 3PB-Versuchen wurde das obengenannte Teilentlastungsverfahren angewandt, da sich die elastische Nachgiebigkeit einer angerissenen Probe mit wachsender Risslänge erhöht.

Bei der Wahl der Prüftemperaturen wurden zunächst RT- und -40°C -Versuche zur Abschätzung der ungefähren Lage der Übergangstemperatur T_{100} durchgeführt und nach Bestimmung der ungefähren Lage der Übergangstemperatur 0°C als weitere Prüftemperatur gewählt.

Die Versuchsdurchführung wurde über das Programm „LAB Master“ gesteuert und überwacht.

Hierzu wurden dem Programm die Versuchsparameter, also die allgemeine Probengeometrie mit $W = 20\text{mm}$, $B = 10\text{mm}$ und $B_N = 8\text{mm}$ sowie die Parameter der Teilentlastung (Verfahrweg, Zustellung, Haltezeit, Kraftsenkung der Teilentlastung) und die Abbruchkriterien vorgegeben. Als Abbruchkriterien wurden eine maximale Probendurchbiegung von $f = 5\text{mm}$, eine maximale Risslänge von $a = 11\text{mm}$ und ein Kraftabfall von 80% gewählt.

Vor dem jeweiligen Versuchsbeginn wurden die Proben hinsichtlich ihrer Maße W und B vermessen und B_N bei einer Seitenkerbtiefe von je 1mm durch $B_N = B - 2 \cdot 1\text{mm}$ bestimmt und für den Versuch im Programm eingegeben. Danach wurde die Probe mit Hilfe einer Justierhilfe in die Versuchsvorrichtung mit einer Vorlast von 300N bei Raumtemperaturversuchen oder 700N bei den 0°C - und -40°C -Versuchen eingespannt (siehe Abb. 4.7).

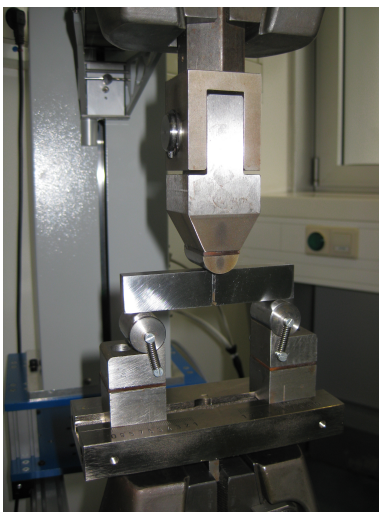


Abbildung 4.7: 3PB-Versuchsvorrichtung

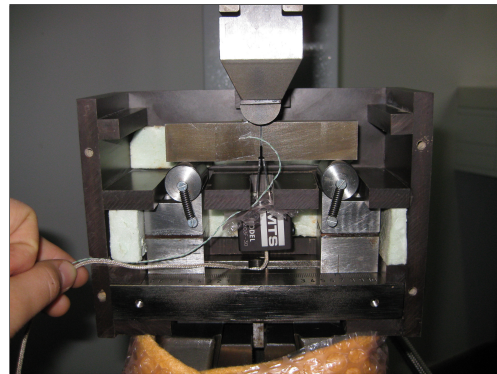


Abbildung 4.8: 3PB-Vorrichtung mit Kühlkammer, Temperaturfühler und COD-Clip

Außerdem wurde zur Messung der Kerbaufweitung V oder COD (crack opening displacement) ein COD-Mess-Clip in die spezielle Kerbgeometrie (siehe Abb. 4.9 und 4.8) eingebracht. Bei den 0°C - und -40°C -Versuchen wurde zusätzlich ein Temperaturfühler angebracht, der über eine Steuerung und die durch ein Ventil regelbare Stickstoffzufuhr die Temperatur in der Kühlkammer regelte (siehe Abb. 4.8).



Abbildung 4.9: Proben mit spezieller Kerbgeometrie

Vor Starten des eigentlichen 3PB-Versuches wurde ein vom Programm geforderter sogenannter a_0 -check durchgeführt, bei dem die Länge des Startrisses ermittelt wurde, indem die Probe dreimal

kraftgesteuert mit 1kN belastet und nach kurzem Halten wieder entlastet wurde.

Nach dem Ermitteln der Startrisslänge wurde der 3PB-Versuch gestartet, wobei der Versuch nach im Programm festgelegten Schleifen verlief, bis eines der Abbruchkriterien den Versuch beendete. Diese Schleifen beinhalten eine weggesteuerte Zustellung von 10 bis 15µm bei einer Geschwindigkeit von 0,4mm/min, ein 20-sekündiges Halten auf dieser Position und eine kraftgesteuerte Teilentlastung von 20% mit einer Geschwindigkeit von 100N/s. Während der Versuchsdurchführung wurden die Kerbaufweitung und die Kraft gemessen und daraus vom Programm die entsprechenden Werte für Δa , a und J sowie weitere für die weiteren Betrachtung nicht relevanten Parameter berechnet.

Der Versuch verläuft für RT-, 0°C- und –40°C-Versuche weitgehend gleich, es muss lediglich beachtet werden, dass bei den Temperaturen unterhalb RT, bei denen die Kühlkammer zum Einsatz kommt, vor dem Versuchsstart die Dauer der Abkühlung der Prüfkammer und die Durchkühldauer der Probe von ca. 15min abgewartet werden muss. Bei den Versuchen unterhalb RT herrscht durch die Temperaturregelung über ein gesteuertes Ventil eine Temperaturgenauigkeit von $\pm 1\text{K}$ vor.

4.4.2 Versuchsauswertung

Ausmessung des Startrisses

Zur Auswertung der bruchmechanische Versuche war die Länge des Startrisses bei Versuchsbeginn notwendig. Das Programm liefert dafür durch den a_0 -check einen Wert, der aber nicht unbedingt mit dem tatsächlichen Wert übereinstimmt. Aus diesem Grund wurden die Proben mit flüssigem Stickstoff 15min durchgekühlt und anschließend zerbrochen, wodurch die Rissfläche sichtbar wurde. Da der Ermüdungsanriss durch eine zyklische Belastung hervorgerufen wurde, zeigt dessen Rissanteil ein anderes Bruchbild als die durch den 3PB-Versuch entstandene Rissverlängerung (siehe Abb. 4.10), wodurch es möglich ist, die Länge des Startrisses also die Ermüdungsanrisslänge zu bestimmen.

Die Ermüdungsrisslänge wurde mit Hilfe eines Stereo-Mikroskopes und dem Programm „analysis work“ ermittelt, indem ein Messraster (siehe Abb. 4.11) so auf das entstandene Bild gelegt wurde, dass auf der Bruchfläche neunmal, wie in [nor02] gefordert, die Ermüdungsrisslänge bestimmt werden konnte. Mit Gl. (16) wurde aus den erhaltenen Daten a_0 berechnet.

$$a_0 = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_1 + a_9}{2} \right) + \sum_{j=2}^8 a_j \right] \quad (16)$$

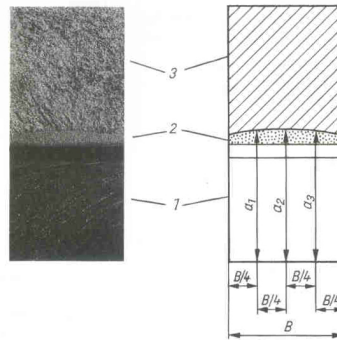


Abbildung 4.10: Ermittlung der Risslänge aus der Probenbruchfläche, aus [1, S.96]
1 mechanischer Kerb, 2 Ermüdungsanriss, 3 Restbruch

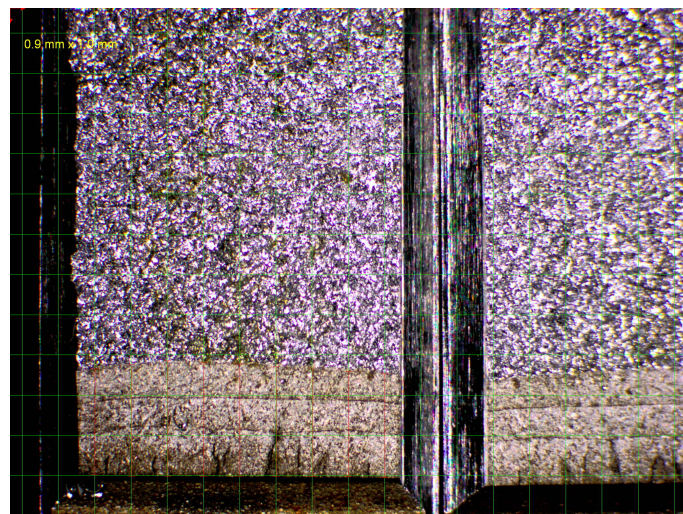
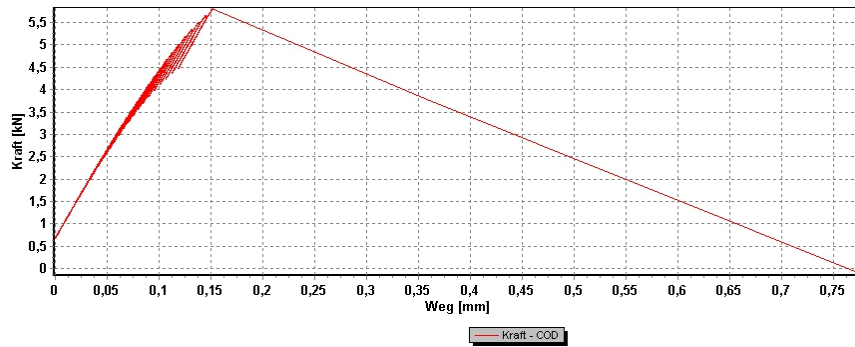
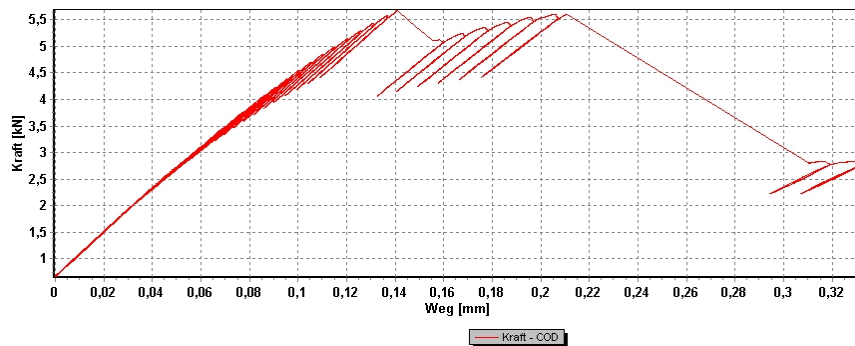


Abbildung 4.11: Bruchfläche der Probe 44-5-3 mit Messraster

Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte

Bei der Ermittlung der bruchmechanischen Werkstoffkennwerte konnte zunächst allgemein für beide AFP-Stähle festgestellt werden, dass sowohl der 18MnVS5 als auch der 30MnVS6+Ti kein Risswiderstandsverhalten zeigten, sondern sprödes Bruchverhalten aufwiesen. In der Versuchsauswertung zeigte sich dies entweder durch Sprödbbruch (siehe Abb. 4.12) oder durch mehrmaliges instabiles Risswachstum, auch Pop-In (siehe Abb. 4.13) genannt.

Der sogenannte Pop-In bedeutet, dass eine abrupte Diskontinuität im Kraft-COD-Verhältnis auftritt (siehe [nor02]), also eine plötzliche Zunahme der Kerbaufweitung COD und eine Abnahme der Kraft F . Hierbei ist es erforderlich, dass nach dieser abrupten Diskontinuität sowohl die Kraft als auch die Kerbaufweitung wieder weiter ansteigen. Eine weitere Bedingung für ein signifikantes Pop-In ist ein mindestens 5%-iges Absinken der Kraft gegenüber dem vorherigen Wert.


 Abbildung 4.12: F-COD-Diagramm 44-6-3, Sprödbbruch, Versuch bei -40°C

 Abbildung 4.13: F-COD-Diagramm 43-6-2, Pop-In, Versuch bei 0°C

Die Auswertung und Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte beginnt mit der Bestimmung der zur Berechnung notwendigen Kräfte. Hier unterscheidet sich das Verfahren bei der Auswertung des Bruches von dem der Aufwertung des Pop-In. Im folgenden wird zunächst das Vorgehen bei Pop-In beschrieben.

Wenn der Versuch ein Pop-In-Verhalten zeigt, wird zunächst die zur Berechnung benötigte Kraft F_Q bestimmt, indem man das erste signifikante Pop-In bestimmt, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die Kraft F nach dem Pop-In mindestens 5% kleiner ist als die Kraft vor dem Pop-In. Es wird also überprüft, ob Gl. (17) zutrifft.

$$\frac{\Delta F}{F} \geq 0,05 \quad (17)$$

Falls Gl. (17) zutrifft, entspricht die Kraft vor dem Pop-In der Kraft F_Q . Die für die Berechnungen ebenfalls benötigte Kraft F_{max} entspricht der höchsten im Versuch gemessenen Kraft. An dieser Stelle kann, falls Gl. (18) zutrifft, bereits überprüft werden, ob eine gültige K_{Ic} -Bestimmung möglich ist:

$$\frac{F_{max}}{F_Q} \leq 1,1 \quad (18)$$

Der nächste Schritt ist die Ermittlung des Bruchwiderstandes J und die Bestimmung, ob das gemessene J ein J_c oder ein J_u ist. Da J während des Versuches bereits durch das Programm „LAB Master“ berechnet wurde, muss für das der Kraft F_Q zugeordnete J noch die Festlegung erfolgen, ob J_u oder J_c vorliegt. J_u und J_c sind geometrieabhängige Bruchwiderstände, die abhängig vom plastischen Verformungsgrad der Probe sind. Dabei ist J_c derjenige Wert, der aufweist, dass die Probe einen bestimmten sehr geringen plastischen Verformungsgrad nicht überschreitet, wohingegen Proben mit einem J_u einen plastischen Verformungsgrad besitzen. Die genaue Festlegung ist durch die Gleichungen (19) und (20) berechenbar.

$$\Delta a < 0,2\text{mm} + \frac{J}{3,75 \cdot R_m} \Rightarrow J = J_c \quad (19)$$

$$\Delta a \geq 0,2\text{mm} + \frac{J}{3,75 \cdot R_m} \Rightarrow J = J_u \quad (20)$$

Der so ermittelte J_u - oder J_c -Wert entspricht dem Bruchwiderstand.

Mit Hilfe der Kraft F_Q , des Geometriefaktors $f_1 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ (siehe Gl. (21)) und der Probengeometrie wird nun die vorläufige Bruchzähigkeit K_Q bestimmt. Vorläufig ist K_Q , da das Gültigkeitskriterium Gl. (23) noch überprüft werden muss, falls Gl. (18) eine gültige K_{Ic} -Bestimmung zulässt.

$$f_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) = 3 \cdot \left(\frac{a_0}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1,99 - \frac{a_0}{W} \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W} \right) \left[2,15 - 3,93 \cdot \frac{a}{W} + 2,7 \cdot \left(\frac{a_0}{W} \right)^2 \right]}{2 \cdot \left(1 + \frac{2a_0}{W} \right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (21)$$

$$K_Q = \frac{S}{W} \cdot \frac{F_Q}{(B \cdot B_N \cdot W)^{\frac{1}{2}}} \cdot f_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (22)$$

$$B, a_0, W - a_0 \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2 \Rightarrow K_Q = K_{Ic} \quad (23)$$

Falls der Versuch kein Pop-In- sondern ein Bruch-Verhalten aufwies, unterscheidet sich der Ablauf zur Bestimmung der Bruchzähigkeit und des Bruchwiderstandes lediglich in der Bestimmung der Kraft F_Q . Beim Bruch-Verhalten wurde zur Ermittlung der Kraft F_Q die 5%-Sekanten-Methode angewandt. Diese besagt, dass in das F -COD-Diagramm eine Gerade eingetragen wird, deren Anstieg 5% geringer ist, als der des linearen Bereiches der F -COD-Kurve (siehe Abb. 4.14). Nun ist F_Q diejenige Kraft, bei der die um 5% abgesenkte Sekante die F -COD-Kurve schneidet.

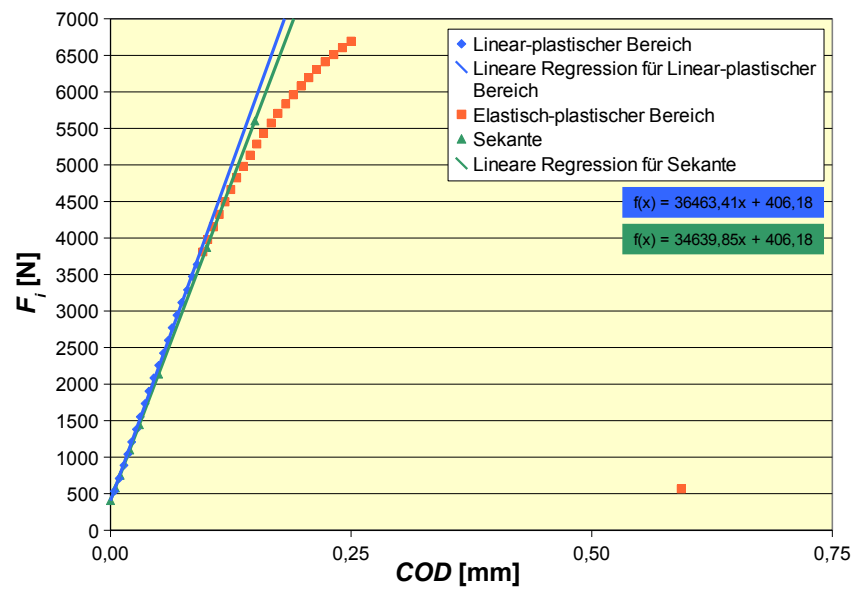


Abbildung 4.14: F-COD-Diagramm 44-5-2, Versuch bei Raumtemperatur

Die durch die Berechnung ermittelten Werte sind in Tabelle 4.3 und 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: J - und K_Q -Werte des 30MnVS6+Ti

Probe	Temperatur	J_c [kN/m]	J_u [kN/m]	$K_Q = K_{Ic}$	K_Q [MPa · \sqrt{m}]
43-5-3	RT	-	-	nein	-
43-5-4	RT	25,33	-	nein	47,22
43-5-5	RT	-	45,77	nein	57,49
43-5-6	RT	-	37,22	nein	52,92
43-6-1	RT	21,56	-	nein	42,93
43-6-4	-40°C	20,48	-	nein	42,09
43-6-5	-40°C	18,86	-	nein	39,83
43-6-6	-40°C	12,42	-	nein	37,41
43-7-1	-40°C	18,88	-	nein	41,60
43-7-2	-40°C	19,02	-	nein	41,55
43-6-2	-0°C	51,83	-	nein	56,77
43-6-3	-0°C	34,10	-	nein	55,83
43-7-3	-0°C	31,70	-	nein	54,70
43-7-4	-0°C	33,54	-	nein	52,32

Tabelle 4.4: J - und K_Q -Werte des 18MnVS6+Ti

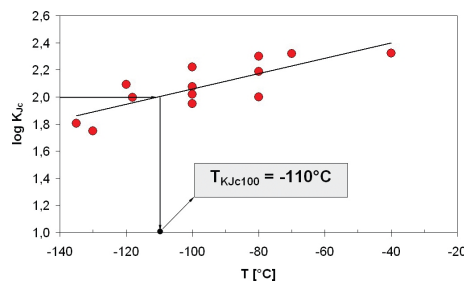
Probe	Temperatur	J_c [kN/m]	J_u [kN/m]	$K_Q = K_{Ic}$	K_Q [MPa · \sqrt{m}]
43-5-2	RT	15,50	-	nein	45,26
43-5-3	RT	26,40	-	nein	46,01
43-5-4	RT	18,62	-	nein	42,82
43-5-5	RT	13,74	-	nein	36,04
43-5-6	RT	12,13	-	nein	32,05
43-6-3	-40°C	21,24	-	nein	45,08
43-6-6	-40°C	26,53	-	nein	42,61
43-7-1	-40°C	23,61	-	nein	44,99
43-7-2	-40°C	13,62	-	nein	34,16
43-7-3	-40°C	15,27	-	nein	37,49
43-6-1	-0°C	25,84	-	nein	46,53
43-6-2	-0°C	21,20	-	nein	46,05
43-6-5	-0°C	23,93	-	nein	44,69
43-7-4	-0°C	26,12	-	nein	47,28

Ermittlung der Übergangstemperatur nach Wallin

Für die Ermittlung der für die Bauteilsicherheit relevanten 5%- und 95%-Quantile der Bruchzähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur muss die Übergangstemperatur T_{100} bestimmt werden. Diese Temperatur wird in der von Prof. Kim R. W. Wallin entwickelten sogenannten Masterkurve, welche die 5%- und 95%-Quantile beinhaltet, genutzt.

Für die Bestimmung der Temperatur T_{100} werden zunächst über die Gleichung (24) die Werte für K_{Ic}^J aus den jeweiligen J -Werten (siehe Tabellen 4.3 und 4.4) und Werkstoffparametern ($E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,3$) berechnet. Mit Hilfe der erhaltenen Werte wird der $\log K_{Ic}^J$ gebildet und in ein T - $\log K_{Ic}^J$ -Diagramm eingetragen. In diesem Diagramm wird nun eine Trendlinie über alle Wertepaare eines Werkstoffes bei den verschiedenen Prüftemperaturen entwickelt, anhand der bei $\log K_{Ic}^J = 2$ (das entspricht $K_{Ic}^J = 100 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$) die Übergangstemperatur T_{100} abgelesen wird (siehe Beispiel: Abb. 4.15).

$$K_{Ic}^J = \left(\frac{E \cdot J_{Ic}}{1000 \cdot (1 - \nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Abbildung 4.15: Beispiel zur T_{100} -Bestimmung aus [4]

Bei der Bestimmung der T_{100} traten an dieser Stelle große Probleme auf, die auf die fehlende Berücksichtigung des plastischen Anteils durch die 5%-Sekanten-Methode bei der Bestimmung der Kraft ΔF bei den RT-Versuchen zurück geführt wurden. Gelöst wurde dieses Problem, indem der plastische Anteil bei der Festlegung von ΔF berücksichtigt wurde. Die dadurch entstehenden aktualisierten J -Werte finden sich in den Tabellen 4.5 und 4.6

Tabelle 4.5: Aktualisierte J - und K_Q -Werte des 30MnVS6+Ti

Probe	Temperatur	J_c [kN/m]	J_u [kN/m]	$K_Q = K_{Ic}$	K_Q [MPa · \sqrt{m}]
43-5-3	RT	-	-	nein	-
43-5-4	RT	58,39	-	nein	67,94
43-5-5	RT	-	45,77	nein	57,49
43-5-6	RT	-	37,22	nein	52,92
43-6-1	RT	59,94	-	nein	67,36
43-6-4	-40°C	20,48	-	nein	42,09
43-6-5	-40°C	18,86	-	nein	39,83
43-6-6	-40°C	12,42	-	nein	37,41
43-7-1	-40°C	18,88	-	nein	41,60
43-7-2	-40°C	19,02	-	nein	41,55
43-6-2	-0°C	51,83	-	nein	56,77
43-6-3	-0°C	34,10	-	nein	55,83
43-7-3	-0°C	31,70	-	nein	54,70
43-7-4	-0°C	33,54	-	nein	52,32

Tabelle 4.6: Aktualisierte J - und K_Q -Werte des 18MnVS6+Ti

Probe	Temperatur	J_c [kN/m]	J_u [kN/m]	$K_Q = K_{Ic}$	K_Q [MPa · \sqrt{m}]
43-5-2	RT	63,92	-	nein	67,42
43-5-3	RT	26,40	-	nein	46,01
43-5-4	RT	20,20	-	nein	44,59
43-5-5	RT	-	31,01	nein	48,57
43-5-6	RT	-	25,62	nein	44,39
43-6-3	-40°C	21,24	-	nein	45,08
43-6-6	-40°C	26,53	-	nein	42,61
43-7-1	-40°C	23,61	-	nein	44,99
43-7-2	-40°C	13,62	-	nein	34,16
43-7-3	-40°C	15,27	-	nein	37,49
43-6-1	-0°C	41,73	-	nein	57,18
43-6-2	-0°C	129,37	-	nein	74,53
43-6-5	-0°C	35,97	-	nein	53,43
43-7-4	-0°C	43,85	-	nein	58,88

Mit den aktualisierten Daten wurden für die AFP-Stähle die folgenden T_{100} ermittelt:

$$18\text{MnVS5: } T_{100} = 28,66^\circ\text{C}$$

$$30\text{MnVS6+Ti: } T_{100} = 11,05^\circ\text{C}$$

Anhand der ermittelten T_{100} für die AFP-Stähle konnten mit Hilfe der Weibull-Verteilung die Masterkurven nach Wallin erstellt werden. Hierfür wurden die $T - T_{100}$ jedes Werkstoffes bestimmt und mit dem jeweiligen K_{mat} in die Masterkurve eingetragen. Die $T - T_{100}$ -Werte werden ermittelt, damit ein besserer Vergleich zwischen verschiedenen Werkstoffen und eine Bestimmung der für die Bauteilsicherheit relevanten Quantilwerte erfolgen kann. Die Ergebniss-Diagramme sind in den Abbildungen 4.16 und 4.17 zu sehen.

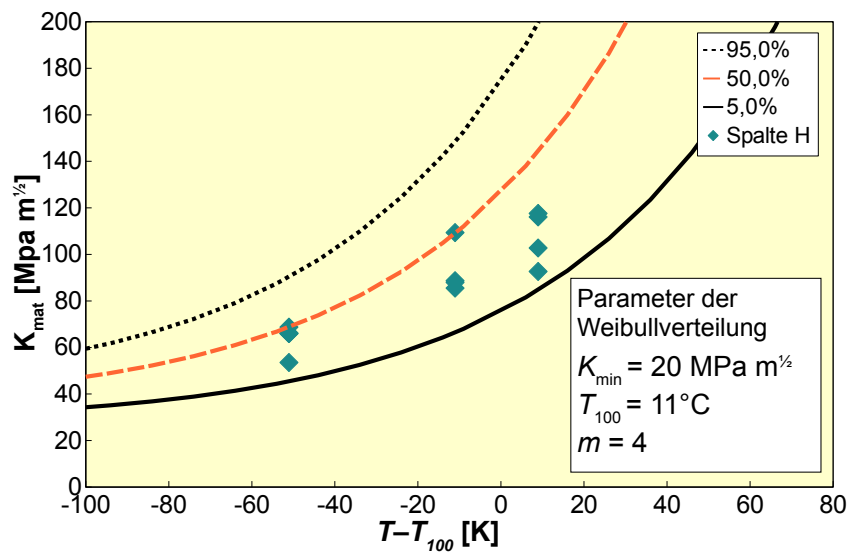


Abbildung 4.16: Masterkurve des 30MnVS6+Ti

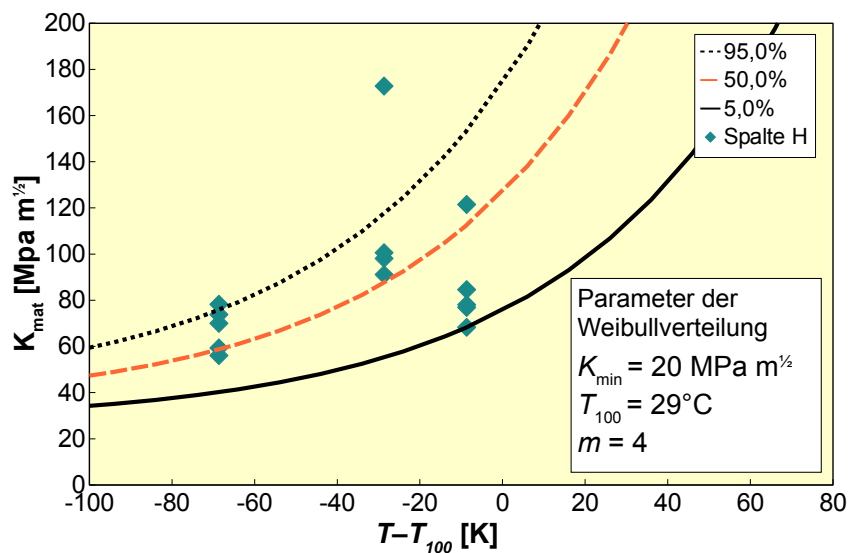


Abbildung 4.17: Masterkurve des 18MnVS5

Zusammenhang von T_{100} und T_{27J} nach Sanz

Um den Zusammenhang zwischen den Übergangstemperaturen aus den KSB-Versuchen und den statischen Bruchmechanikversuchen zu ermitteln, wird die Sanz-Korrelation genutzt. Diese Korrelation nutzt den Zusammenhang zwischen T_{100} und T_{27J} :

$$T_{100} = T_{27J} - 18^{\circ}\text{C} \quad (25)$$

An folgendem Beispiel ist dieser Zusammenhang an einigen Werkstoffen erkenntlich gemacht (siehe Abb. 4.18).

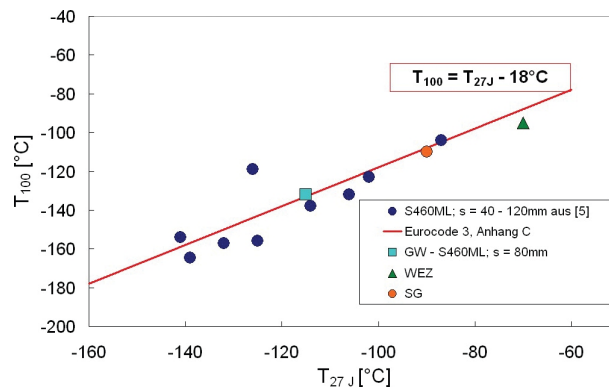


Abbildung 4.18: Korrelation der T_{100} und T_{27J} nach Sanz aus [4]

Für die beiden untersuchten Stähle 18MnVS5 und 30MnVS6+Ti wurde ebenfalls ein solches Diagramm angefertigt, bei dem jedoch der deutliche Abstand der Wertepaare, vor allem beim 30MnVS6+Ti, von der Korrelationsgerade auffällt (siehe Abb. 4.19). Es scheint so, als dass die untersuchten Werkstoffe der Korrelation nur bedingt entsprechen.

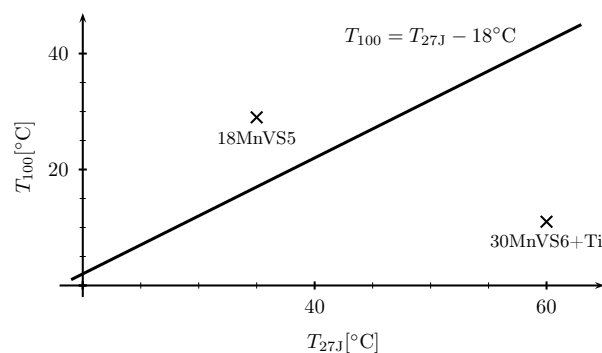


Abbildung 4.19: Sanz-Korrelation für AFP-Stahl

Des weiteren ist zu erwähnen, dass für den 18MnVS5 die Übergangstemperatur T_{40J} genutzt wurde, die anscheinend dennoch eine ähnliche oder die selbe Korrelation wie die Übergangstemperatur T_{27J} aufweist.

5 Zusammenfassung

Wie laut Aufgabenstellung gefordert wurden weitere Untersuchungen zu den Ergebnissen der Kerbschlagbiege-Versuche der vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeit angestellt. Es wurde der mathematische Hintergrund der Av-T-Kurven-Bestimmung dargelegt und die Korngrößen einiger repräsentativer Proben bestimmt, um weitere Ursachen für die hohen Differenzen der Kerbschlagarbeitswerte zu finden. Die Korngrößenbestimmung konnte im Fall der Proben 44-1-5 und 44-1-6, bei 44-1-6 eine größere Korngrößenkennzahl G und somit ein feineres Korn feststellen als bei 44-1-5, bei den Proben 44-3-3 und 44-3-4 konnte jedoch mit der gewählten Methode kein Korngrößenunterschied festgestellt werden.

Die Ergebnisse der statischen Bruchmechanik-Versuche waren Bruchwiderstandswerte und Bruchzähigkeitswerte für beide Werkstoffe. Die daraus berechneten Übergangstemperaturen ergeben bei 18MnVS5 eine Temperatur $T_{100} = 29^{\circ}\text{C}$ und bei 30MnVS6+Ti die Temperatur $T_{100} = 11^{\circ}\text{C}$. Mit diesen Werten wurden die Masterkurven nach Wallin erstellt, an denen die für sicherheitsrelevante Bauteile wichtigen 5%- und 95%-Quantile abgelesen werden können.

Des weiteren wurde durch die Sanz-Korrelation der Zusammenhang zwischen der Übergangstemperatur T_{27J} aus den Kerbschlagbiege-Versuchen und der T_{100} dargestellt. In dieser Darstellung fiel auf, dass, während die Werte des 18MnVS5 einen relativ geringen Abstand zur Korrelationsgeraden aufwiesen, die Werte des 30MnVS6+Ti einen hohen Abstand von der Korrelationsgeraden zeigen.

Anhang

A Auszug Praxismodularbeit Mirjam Kny, August 2011

A.1 Wertetabelle 18MnVS5

Probenbezeichnung	Prüftemperatur T [°C]	Kerbschlagarbeit A_v [J]	Mittelwert A_v [J]
44-2-3	-22	15,7	15,70
44-4-6	-10	4,0	4,10
44-5-1	-10	4,2	
44-1-5	0	5,7	47,70
44-1-6	0	58,2	
44-2-6	0	58,2	
44-4-3	0	65,2	
44-4-4	0	51,2	
44-1-1	20	20,2	24,40
44-1-2	20	11,2	
44-3-1	21	16,0	
44-4-5	21	50,2	
44-2-4	30	52,2	48,15
44-2-5	30	66,2	
44-3-3	30	16,0	
44-3-4	30	58,2	
44-1-3	50	34,7	36,37
44-1-4	50	40,2	
44-3-2	50	34,2	
44-3-5	60	40,2	43,20
44-3-6	60	46,2	
44-4-1	80	133,2	116,70
44-4-2	80	100,2	
44-2-1	100	139,2	140,70
44-2-2	100	142,2	

A.2 Wertetabelle 30MnVS6+Ti

Probenbezeichnung	Prüftemperatur T [°C]	Kerbschlagarbeit A_v [J]	Mittelwert A_v [J]
43-2-3	-22	7,2	7,20
43-1-5	0	7,2	8,30
43-1-6	0	9,2	
43-1-1	20	13,2	12,70
43-1-2	20	12,2	
43-1-3	50	22,0	21,92
43-1-4	50	22,0	
43-3-5	50	20,2	
43-3-6	50	24,2	
43-4-1	50	21,2	
43-2-4	60	26,2	25,90
43-2-5	60	25,7	
43-4-2	60	21,2	
43-4-3	60	31,2	
43-4-4	60	25,2	
43-2-6	70	32,2	34,15
43-3-2	70	41,2	
43-4-5	70	29,2	
43-4-6	70	34,0	
43-2-1	100	38,2	36,95
43-2-2	100	35,7	
43-3-3	150	44,2	48,70
43-3-4	150	53,2	
43-5-1	200	42,2	42,20
43-3-1	falscher Kerb, kein Versuch		

A.3 Härtemessung

Tabelle 5.1: Härtemessung am Werkstoff 18MnVS5

Probe	Prüftemperatur T [°C]	A_v [J]	Messung	d_{mittel} [mm]	HV_{10}	Mittelwert HV_{10}
44-1-5	0	5,7	1	0,2795	236,30	240,19
			2	0,2775	240,58	
			3	0,274	246,76	
			4	0,2795	237,14	
44-1-6	0	60,0	1	0,2925	216,53	221,55
			2	0,2795	237,14	
			3	0,289	221,81	
			4	0,2965	210,73	
44-3-3	30	16,0	1	0,2835	230,50	235,00
			2	0,284	229,69	
			3	0,2735	247,66	
			4	0,2825	232,13	
44-3-4	30	58,2	1	0,284	229,69	234,36
			2	0,2935	215,06	
			3	0,276	243,20	
			4	0,2725	249,48	

A.4 Chemische Analyse

Tabelle 5.2: Chemische Analyse ausgewählter Proben des Werkstoffes 18MnVS5

Probe	Stoffkonzentration [%]							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
44-1-5	0,158	0,509	1,273	0,0261	0,0046	0,053	0,000	0,143
44-1-6	0,163	0,509	1,311	0,0233	0,0044	0,051	0,000	0,143
44-3-3	0,162	0,511	1,274	0,0268	0,0046	0,055	0,000	0,144
44-3-4	0,167	0,518	1,306	0,0256	0,0052	0,052	0,000	0,145

Normenverzeichnis

- [nor90] Norm DIN EN 10045 Teil 1 1990. *Kerbschlagbiegeversuche nach Charpy*
- [nor98] Norm DIN EN 10267 1998. *Von Warmformgebungstemperatur ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle*
- [nor02] Norm ISO/FDIS 12135 2002. *Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness*
- [nor03] Norm DIN EN ISO 643 2003. *Mikrophotographische Bestimmung der scheinbaren Korngröße*
- [nor04] Norm DIN EN ISO 643 Berichtigung 1 2004. *Mikrophotographische Bestimmung der scheinbaren Korngröße*
- [nor05] Norm DIN EN 6507 2005. *Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfmethoden*

Literaturverzeichnis

- [1] Horst Blumenauer and Gerhard Pusch. *Technische Bruchmechanik*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig/Stuttgart, 3 edition, 1993.
- [2] *Bruchmechanik*. URL: <<http://de.wikipedia.org/wiki/Bruchmechanik>>, Datum des Auffindens: 14.Juni. 2011.
- [3] Hans-Albert Richard and Manuela Sander, editors. *Ermüdungsrisse*. Vieweg und Teubner Verlag, 2009.
- [4] Thomas Brecht and Rolf Paschold. *Schweißen von Feinkornbaustählen und deren Eignung für Offshore-Windenergieanlagen*. Stahlbau 74, Heft 6, Verlag Ernst & Sohn, 2005.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

Mittweida, den 24. November 2011

Ort, Datum, Unterschrift des Verfassers